DOI:10.13866/j.azr.2024.03.10

土壤含水量对探地雷达探测植物根系构型精度的影响

王　勃[1]，张建军[1,2]，赖宗锐[1]，赵炯昌[1]，胡亚伟[1]，杨　周[1]，李　阳[1]，卫朝阳[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京　100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，山西 吉县　042200）

摘　要：根系是评价植被生态服务功能的关键基础要素，但快速、精确、无损确定根系的测量技术和方法是目前生态系统评估中的瓶颈。探地雷达是一种高效无损的地球物理学技术，可以在无损状态下获取土壤中的根系信息。但是探地雷达检测和识别根系的精度受土壤含水量、根系含水量、根径大小、根系埋藏深度等诸多因素影响，导致其在野外根系探测中适用性受限，为了探究土壤含水量对探地雷达探测根系精度的影响，本研究采用野外预埋根系的控制实验，根据探地雷达波速、振幅和根点反射系数的变化，分析了不同土壤含水量条件下根点识别率及根点距离均方根误差。结果表明：(1) 根系探测中，探地雷达波速和振幅是判断土壤含水量变化的重要参数；(2) 随着土壤含水量的增大，探地雷达波速减小，雷达振幅趋于平缓；(3) 不同土层深度上随着根系直径的增大，探地雷达波速增大，雷达振幅趋于激烈；(4) 根点识别率与土壤含水量成负相关($P<0.05$)，土壤含水量为15%~25%时探地雷达对活根的识别效果最佳。本研究表明探地雷达可以作为植物根系生物量无损和快速测定、评估的方法，但在利用探地雷达测定土壤中根系时，应在土壤含水量相对较低的时间段进行。

关键词：探地雷达；根系；土壤含水量；无损探测；晋西黄土区

探地雷达(Ground Penetrating Radar，GPR)通过天线将电磁波发射到地下，利用不同介质的电磁特性差异，产生不连续的反射和散射，从而定性和定量地辨别地下目标物，实现对目标物的无损、快速和精确探测[1]，因此，探地雷达作为一种高效无损的地球物理学技术，被广泛应用于物探领域的探测、成像和特征识别等物探领域域中[2]。

根系在植物生长发育过程中从土壤中汲取水和营养物质，并起着支撑和固定植物体的作用[3]，更是防治水土流失，保育土壤的重要器官。植物的各种生态服务功能均与根系生物量密切相关，因此，根系生物量的准确测定是科学评估森林生态服务功能的基础和关键。但由于土壤不透明属性的限制，埋藏于土层中错综复杂的植物根系难以直接观察与测量，人工调查植物根系耗时费力，调查结果还具有随机性。正是由于根系调查方法具有很大的局限性和挑战性[4]，限制了根系研究的发展，进而影响了对森林生态系统生态服务功能的科学评价[5-7]。

已有研究表明相邻介质之间的介电常数差异，决定了探地雷达电磁波反射能量的强度[8]，植物根系含水量高于周围土壤含水量，根系与土壤之间的介电常数存在明显差异，这为利用探地雷达探测根系提供了可能性[9-10]。近年来探地雷达已被应用于植物根系的无损性探测，与传统探测方法(如挖根法、土钻法、土壤剖面法)相比，探地雷达在探测时不损伤植物、不扰动土壤，在较短的时间内能够完成对野外较大范围的根系探测，具有连续性和可重复性，与微根窗管法、核磁共振成像、高分辨率X射

收稿日期：2023-09-11；　**修订日期：**2023-11-30
基金项目：国家重点研发计划(2022YFE0104700)
作者简介：王勃(1996-)，男，硕士研究生，主要研究方向为林业生态工程. E-mail: wangbo96824@163.com
通讯作者：张建军. E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

线断层扫描(CT)和电阻率成像技术(ERT)等根系探测技术相比,探地雷达具有投入少灵活性强,可在野外较大范围检测植物根系的特点[11]。

Xiao等[12]利用探地雷达对毛竹(*Phyllostachys pubescens*)根系进行研究后指出,探地雷达是根系探测中的可行方法。但探地雷达对根系的探测效果受诸多干扰因素的影响,其探测能力在60 cm土层内较强,且随着土层深度的增加而减弱[13]。探地雷达对土层中根径较粗的根识别率更高,可识别的极限根径为5 mm[14]。研究表明[15-16]探地雷达能在特定环境下有效识别植物根系。Bi等[17]和Sun等[18]研究发现基于深度学习方法下,探地雷达对根系定位和根径估算的精度会更加准确。Dannoura等[19]认为根系与土壤含水量的差异是影响探地雷达对根系检测能力的关键因素。Bain等[20]的研究发现,当土壤含水量与根系含水量之间无显著差异时,探地雷达对根系的识别效率显著下降。但是,对利用探地雷达调查根系生物量时最为适宜的土壤含水量方面的研究,以及利用土壤含水量对探地雷达调查结果进行修正等方面的研究有待进一步深入。为此本研究在山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站的所在地蔡家川流域,采用野外预埋植物根系的控制实验,通过雷达波谱图像分析,定量研究不同土壤含水量对探地雷达波速、振幅和根点识别率的影响,以期为提高探地雷达野外根系探测精度和正确估算根系生物量提供参考依据,为晋西黄土区典型人工林水土保持效益评价和碳汇评价提供科学依据。

1 实验与方法

1.1 实验场地

实验场地位于山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地蔡家川流域(图1a),地理坐标为36°14′27″~36°18′23″N,110°39′45″~110°47′45″E,海拔为904~1592 m,流域呈东西走向,地势西高东低,流域面积为39.33 km^2,流域长度为12.15 km,属于黄土梁状丘陵沟壑区,黄土母质,流域内土壤为褐土,土层厚度数十米,土质较均匀[21-22]。该研究区属于暖温带大陆性气候,年平均气温10 ℃。平均降水量575.9 mm,多集中在7—10月,年平均蒸发量1687 mm,年平均日照时间2563.8 h,无霜期172 d。主要土地利用类型有林地、农地、荒草地、果园等,主要树种为刺槐、油松、侧柏等。

1.2 研究方法

实验材料油松(*Pinus tabulaeformis*),根系发达,适应性强,耐干旱贫瘠,具有良好的保持水土、涵养水源和改良土壤作用[23],是黄土高原主要造林树

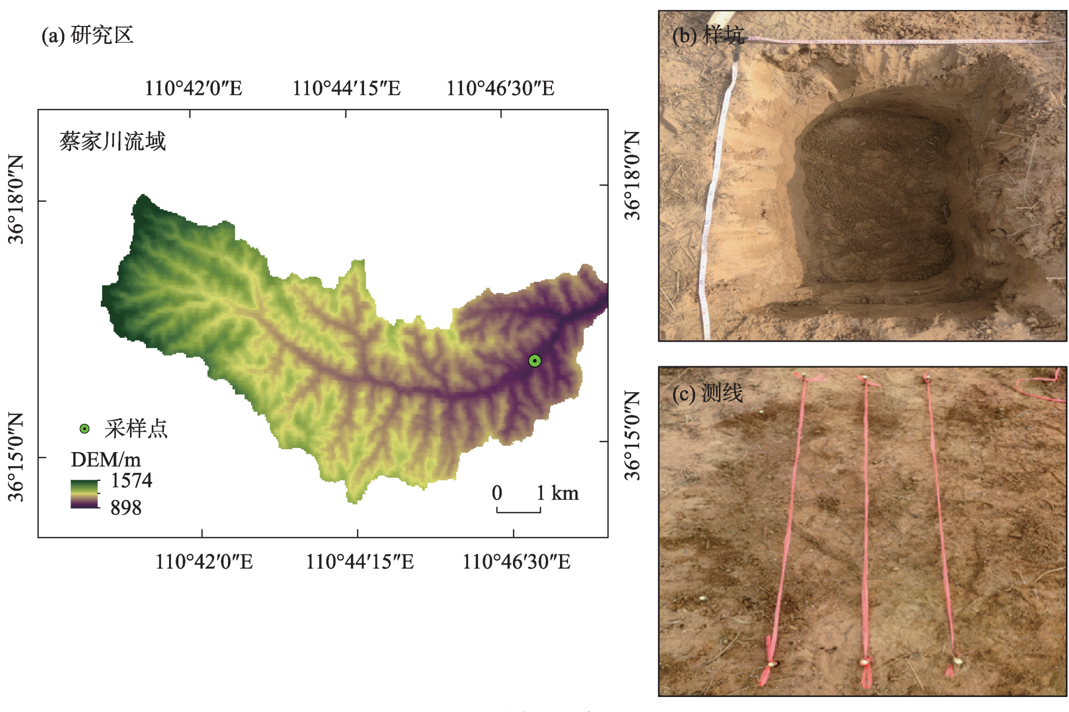


图1　样地示意图

Fig. 1　Chematic diagram of the sample plot

种,因此实验选取油松(*Pinus tabulaeformis*)为研究对象。本研究挖取不同粗度的油松根系作为实验材料,将挖取的油松根截取成30 cm的根段作为样根,并在样根两端涂抹乳胶防止水分散失,用游标卡尺量取样根直径,用电子天平测量样根湿重。

实验坑制作如图1b,在1990年营造的人工油松林内挖1.0 m×0.6 m×0.4 m的样坑,将样坑左边界和上边界的交点确定为坐标原点,原点垂直向土层方向为*Z*轴,左边界、上边界分别定义为*Y*轴和*X*轴。将挖出的土壤剔除植物根系、碾碎、过筛后作为填埋根系土备用。根据崔喜红等[24]的研究,频率为400 MHz < *F*≤ 800 MHz的探地雷达天线能探测根径大于20 mm,深度在2.5 m以内的根系。

样根布设如图2所示,本研究将根径2.0 cm和2.5 cm的样根每间隔10 cm放置于实验样坑内距地面10 cm、20 cm、30 cm土层处,共计16根;将根径4.5 cm的样根每间隔30 cm放置于实验样坑内距地面10 cm、20 cm、30 cm土层处,共计3根,所有样根放置均与样坑上下边界平行,分别记录样根在实验样坑内的空间坐标(*X*、*Y*、*Z*)后,用过筛后无其他根系的均质土填埋实验样坑。填满后在实验坑表面每隔0.2 m设置1条长1 m的红色尼龙绳作为测线(图1c),共计3条,测线设置与样根预埋方向垂直。

实验坑制作好后进行浇水至土壤水分饱和,待实验坑地表无积水后,用探地雷达(CAS.S500,IECAS,China)主机和频率为500 MHz的天线,沿3条测线进行扫描,扫描频率为51.2 Hz,测量方式为测量轮连续点测。其后每隔3 d对实验坑利用探地雷达进行一次扫描,共计扫描5次,每次扫描后使用铝盒按照0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm分层取样,用烘干法测得土壤含水量。

探地雷达的探测原理(图3),探地雷达通过机载天线将高频电磁波从地表以宽频短脉冲的形式发射进入地下,经地下界面和局部目标体反射后返回信号被天线接收并记录[25]。电磁波在地下介质中传播的路径、电磁场强度与波形与介质的电性、几何形态等因素密切相关[26]。因此可以根据回波信号的时延、形状及频谱特性等参数,解释出根系粗度、分布深度、介质结构、性质及空间分布等特征[24]。

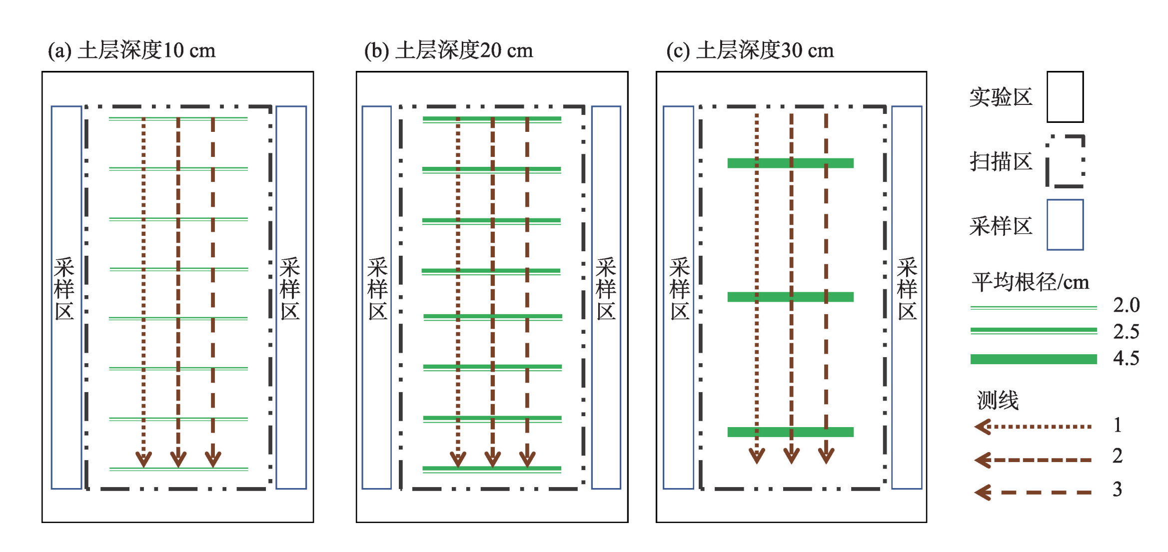
1.3　数据处理

数据使用RadarViewV18.11和ReflexW 9. 5软件进行处理。在RadarViewV18.11中进行背景直流去除和自动增益,然后进行F-K偏移和滤波处理,最后根据数据需求进行分段增益;在ReflexW 9. 5中抽取平均道(subtract-mean)、静校正(static correction)、手动增益(y)(manual gain(y))、背景去除(back ground removal),带通滤波(band passbutter worth)。在ReflexW 9. 5中得到预处理的雷达图像后,进入模块2D-data annalysis中,使用pick the reflector-phase follower进行相位追踪,保存数据后再使用Create LayerShow功能提取雷达波速数据信息。

数据统计和分析使用Excel和Origin 2022,图像后期处理采用Photoshop 2022,在SPSS Statistics 24中使用方差分析对雷达波速进行显著性检验。

1.4　精度验证

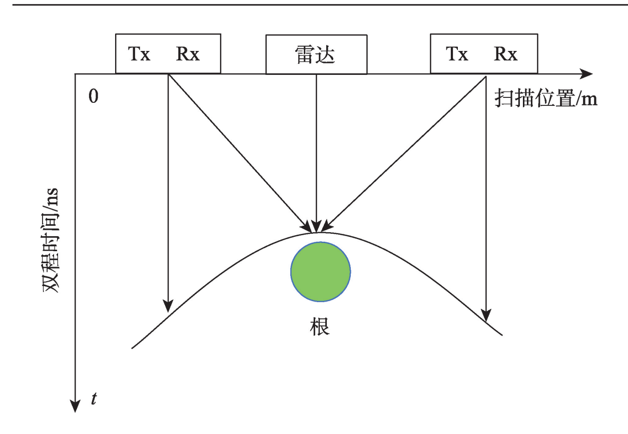
本文的根点识别率参考张璐云等[27]的根点识别定义,即对于特定条件下所有剖面假设实测根点数量为*M*,某一频率对应剖面的雷达图像中提取出



注:实验区范围1.2 m×0.8 m×0.4 m,扫描区范围1.0 m×0.6 m×0.4 m,采样区范围1.0 m×0.1 m×0.4 m。

图2　样根布置示意图

Fig. 2　Sample root layout diagram



注：图中Tx为雷达的发射器，Rx为雷达的接收器，t为雷达信号的双程时间。

图3　雷达双曲线形成示意图

Fig. 3　Schematic diagram of radar hyperbola formation

的可匹配根点数量为N，则该剖面的根点识别率D可以用公式(1)表示：

$$D=\frac{N}{M}\times 100\% \tag{1}$$

计算雷达探测到的根点和实际预埋根点的距离均方根误差(RMSE)，以此作为探地雷达探测根系的精度参考[20]，用公式(2)表示：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1,j=1}^{N}[(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2]}{N}} \tag{2}$$

式中：N为匹配到的根点对数；x_i表示第i个实际预埋根点的横坐标；x_j表示第j个雷达探测根点的横坐标；y_i表示第i个实际预埋根点的纵坐标；y_j表示第j个雷达探测根点的纵坐标。

2　结果与分析

2.1　土壤含水量对探地雷达探测波速的影响

实验测定过程中第1 d、第3 d、第6 d、第9 d和第12 d探测时，0~30 cm土层的平均土壤体积含水量分别为37.3%、29.2%、25.3%、22.5%和15.6%，不同含水量条件下探地雷达探测的平均波速如表1和图4所示。

不同含水量条件下探地雷达的波速有较明显的差别($P<0.05$)。第1 d探测时，10 cm、20 cm和30 cm土层处探地雷达平均波速分别为0.036 m·ns^{-1}、0.058 m·ns^{-1}和0.081 m·ns^{-1}；第12 d探测时，10 cm、20 cm和30 cm土层处探地雷达平均波速分别为0.054 m·ns^{-1}、0.080 m·ns^{-1}和0.089 m·ns^{-1}，可见，随着土壤含水量的降低，探地雷达波速逐渐增大，且随土层深度的增加，雷达波速呈上升趋势。

2.2　土壤含水量对探地雷达探测波谱振幅的影响

探地雷达归一化振幅变化如图5a所示，5次扫描雷达振幅主要集中在262.920 Hz~788.762 Hz。从振幅变化的广度来看，第12 d扫描时，振幅跨度最

表1　土壤体积含水量

Tab. 1　Soil volumetric water content

探测时间/年-月-日	天气	平均雷达波速/(m·ns^{-1})			土壤体积含水量/%			平均土壤体含水量/%
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~30 cm
2023-02-24	晴	0.036	0.058	0.081	42.296	35.100	34.481	37.3
2023-02-27	晴	0.038	0.061	0.082	27.872	30.091	29.748	29.2
2023-03-02	多云	0.041	0.066	0.085	23.617	27.288	24.969	25.3
2023-03-05	晴	0.045	0.068	0.087	21.770	24.798	20.818	22.5
2023-03-08	多云	0.054	0.080	0.089	12.939	14.942	18.813	15.6

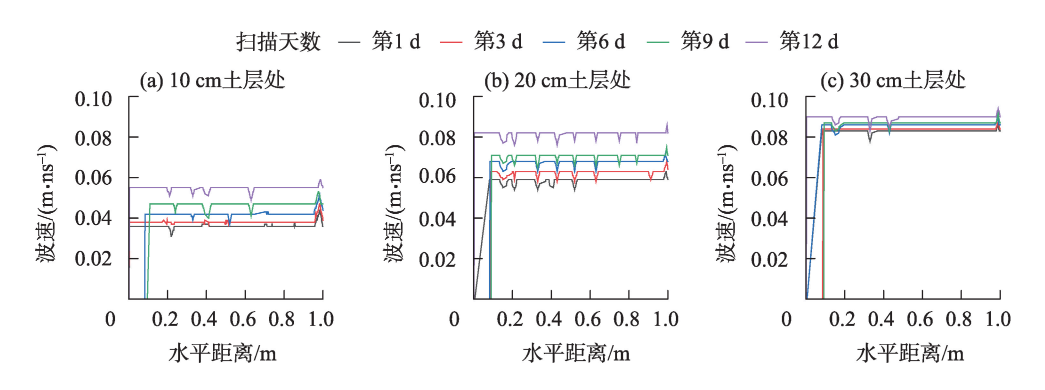


图4　雷达波速变化

Fig. 4　Radar wave velocity variation diagram

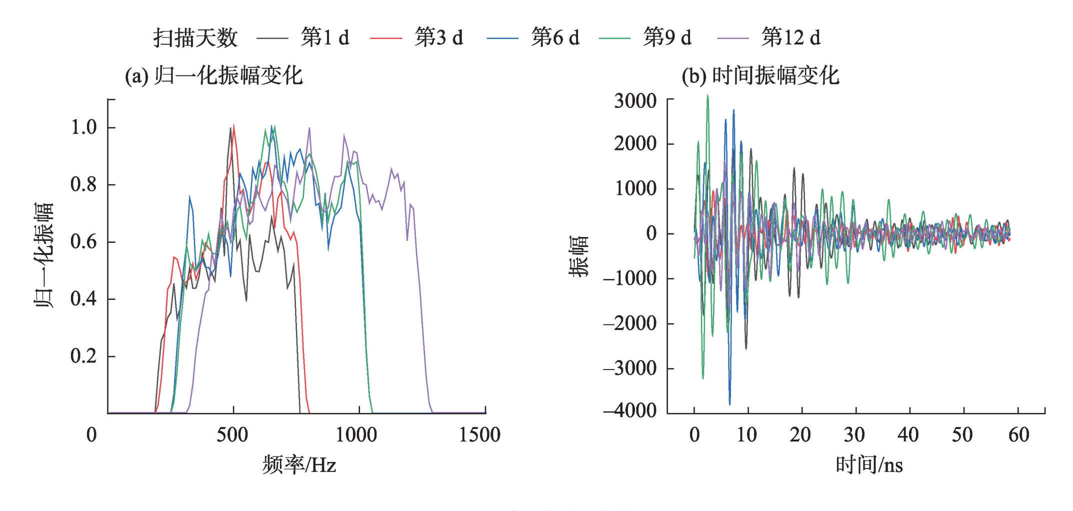


图5 雷达振幅变化

Fig. 5 Radar amplitude variation diagram

表2 样根信息及GPR根点识别率

Tab. 2 Sample root information and GPR root point recognition rate

样根编号	土层深度/cm	平均根径/cm	实际埋根数量/根	每次扫描GPR识别的根数量/根 扫描天数/d					每次扫描GPR根的识别率/% 扫描天数/d				
				1	3	6	9	12	1	3	6	9	12
1~8	10	2.0	8	1	0	2	3	4	12.5	0	25	38	50
9~16	20	2.5	8	5	7	5	8	8	62.5	87.5	62.5	100	100
17~19	30	4.5	3	1	0	2	2	3	33	0	67	67	100
合计			19	6	7	9	13	15	32	37	47	68	79

大，为0 Hz~1500 Hz；从振幅变化的幅度来看，5次扫描的归一化振幅均在0~1之间。如图5b，不同扫描天数时雷达振幅差异明显（$P<0.05$），随探测时程的增大，雷达振幅也逐渐趋于平缓。探测时程的增大即表示土层深度的增大，由于土层逐渐增大，平均土壤含水量趋同，对雷达波谱的影响也逐渐减小，变化波形相似。

2.3 土壤含水量对根点识别的影响

由表2可知，5次雷达探测的识别效果有较大的差异。总体而言，探地雷达根点识别率随探测间隔天数的增大而减小。

5次雷达探测扫描中，根点识别率在第12 d扫描时最高，识别率高达79%；第1 d扫描时，根点识别率为32%，是5次扫描的最低值。从样根埋藏的深度来看，20 cm深度处根点识别效果最好，5次雷达探测扫描时，探地雷达根点识别率分别可以达到62.5%、87.5%、62.5%、100%和100%；10 cm土层处，探地雷达根点识别率最低为0，最大为50%；30 cm土层处，探地雷达根点识别率最低为0，最大为100%。

如图6所示，计算出5次雷达探测扫描的根点距离均方根误差，分别为26.6 cm、25.6 cm、24.8 cm、21.4 cm和18.2 cm。可以看出探地雷达根点距离均方根误差随扫描天数的增加而减小，随平均土壤含水量的减小而减小。

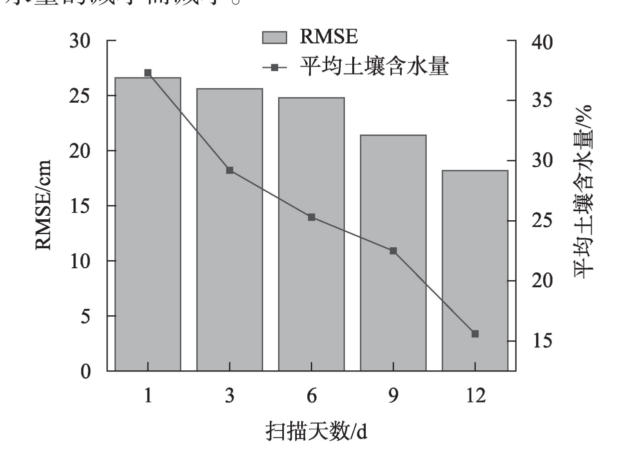


图6 不同扫描天数的探地雷达根点距离均方根误差

Fig. 6 Root-point distance error of ground penetrating radar with different scanning days

3 讨 论

3.1 土壤含水量对探地雷达探测波速的影响

如图7所示,对5次雷达探测时的平均土壤含水量条件下10 cm、20 cm和30 cm土层深度的雷达波速信息进行模型拟合。探地雷达波速与平均土壤含水量之间呈显著的负相关(P<0.05)。3个土层深度上线性拟合的R^2分别为0.916、0.988和0.91。在3个土层深度上,随着平均土壤含水量的增大,探地雷达波速在明显减小(图4),造成这种变化的原因可能是由于第1 d扫描时,样坑表层(0~10 cm)土壤含水量高达42.296%,而下层(20~30 cm)土壤含水量相对较低,为34.481%,由此形成的水分梯度差异导致了这种变化。丰富的水分会导致土壤水分的过滤和再分配的非平稳过程,从而导致土壤的介电常数有很大的变化[28]。在本研究中,雷达天线电磁波传播中遇到的主要介质为土壤和根系,在不同平均土壤含水量条件下,雷达波速不同,即是电磁波所遇介质的介电常数发生了变化。周岐山等[29]研究发现不同频率下计算的雷达波速相同,即雷达波速仅与介质的相对介电常数有关,与雷达波频率无关。这为本研究在使用单一的500 MHz频率天线的实验条件下,得出平均土壤含水量与雷达波速之间呈负相关的结论提供了理论佐证。

3.2 土壤含水量对探地雷达探测波谱振幅的影响

探地雷达的波谱振幅受平均土壤含水量的影响。较高的土壤含水量会导致电磁波信号衰减加速,从而使雷达波谱振幅的频度和幅度都趋于减少和平缓[30]。为了更好地研究平均土壤含水量、根系和波谱振幅之间的关系,本研究使用电磁波反射系数来拟合各因素之间的相关性。

如图8所示,在不同平均土壤含水量条件下,可观察到探地雷达识别的根点附近的电磁波反射系数变化明显。当土壤水分较高且处于较饱和状态时,反射系数较低;相反,干燥的土壤反射系数则呈现较强的响应[31]。当平均土壤含水量为37.3%时,根点附近的电磁波反射系数平均值为0.145,而当平均土壤含水量为15.6%时,根点附近的电磁波反射系数平均值为0.210。因此,雷达波谱振幅随着平均土壤含水量的增加而减小。通过分析认为,平均土壤含水量的增加导致了根系和土壤之间的介电常数差值增大,从而使根点附近的电磁波能量衰减,反射系数变小,而波谱振幅则呈现平缓的变化。电磁波的反射系数取决于界面两边介质的相对介电常数差异,当目标物与周围介质的电磁性参数有较大差别时,反射系数就会较大,即反射波的振幅和能量越强[32]。Ryazantsev等[28]研究认为,土壤水分显著影响雷达电磁波的传播速度和振幅,而探地雷达根点附近的电磁波反射系数随着平均土壤含水量的增加而减小。

5种平均土壤含水量条件下根径与探地雷达识别的根点附近反射系数的拟合关系如图9所示。由图9e可以看出,在平均土壤含水量为37.3%时,根径越大,电磁波反射系数越大。从图9a~9d可知,根径越大,反射系数越小。造成这一现象的原因,可能是由于实验预埋的样根在10 cm和20 cm土层处较细(d=2 cm和d=2.5 cm),而在30 cm土层处较粗(d=4.5 cm),样坑在静置过程中下层土壤水分较表层土壤水分蒸散更慢,含水量更加稳定,对雷达电磁信号的衰减作用更加明显,从而导致下层直径较大的样根反射系数变小。因此,在探地雷达根系探测过程中,应该尽量保证不同土层深度的平均土壤含水量相对稳定且水分差异较小,以此来提高探地雷达的根系识别率。研究认为,在使用探地雷达对根系进行探测时,使用电磁波反射系数、振幅值以及其他物理指标去模拟根径、平均土壤含水量以及其他制约因子之间的相关性是可行的。

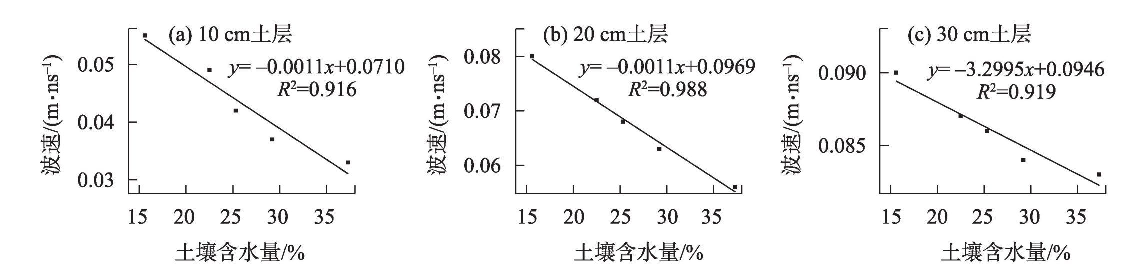


图7　不同平均土壤含水量下雷达波速拟合关系

Fig.7　Fitting relationship of radar wave velocity under different average soil moisture contents

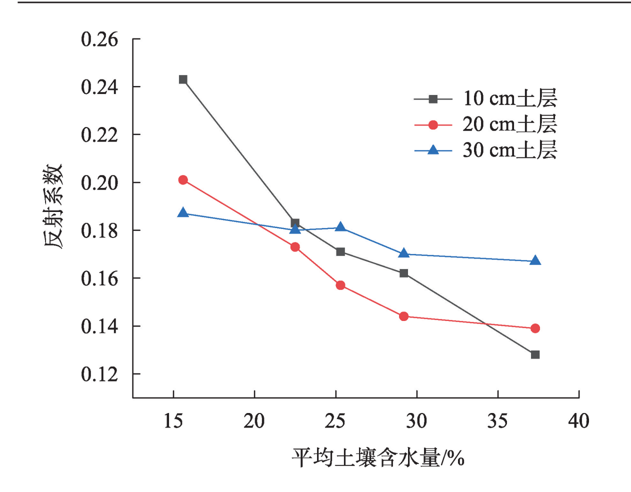


图8 不同平均土壤含水量下探地雷达根点反射系数变化

Fig. 8 Changes in GPR root reflectance coefficient under different average soil moisture content

3.3 土壤含水量对根点识别的影响

具有高电阻率的土壤更适合用于探地雷达检测植物根系，而土壤的电阻率与水分密切相关。Cui等[33]研究认为，降水较多的季节中，探地雷达能量衰减更快，根系探测精度会受到影响。De等[34]和Sun等[18]研究发现，探地雷达根系探测中，高土壤含水量会导致根径估算出现较大误差；Seyfried等[35]研究认为，当芦笋下的土壤比较干燥时，探地雷达识别效果会更好。Cox等[1]研究发现，平均土壤含水量越高，电阻率越低；平均土壤含水量越低，电阻率越高。崔喜红等[24]也得出结论，潮湿肥沃的土壤对探地雷达的探测不利；张璐云等[27]认为平均土壤含水量从浅到深逐渐减小，探地雷达的根点识别率逐渐

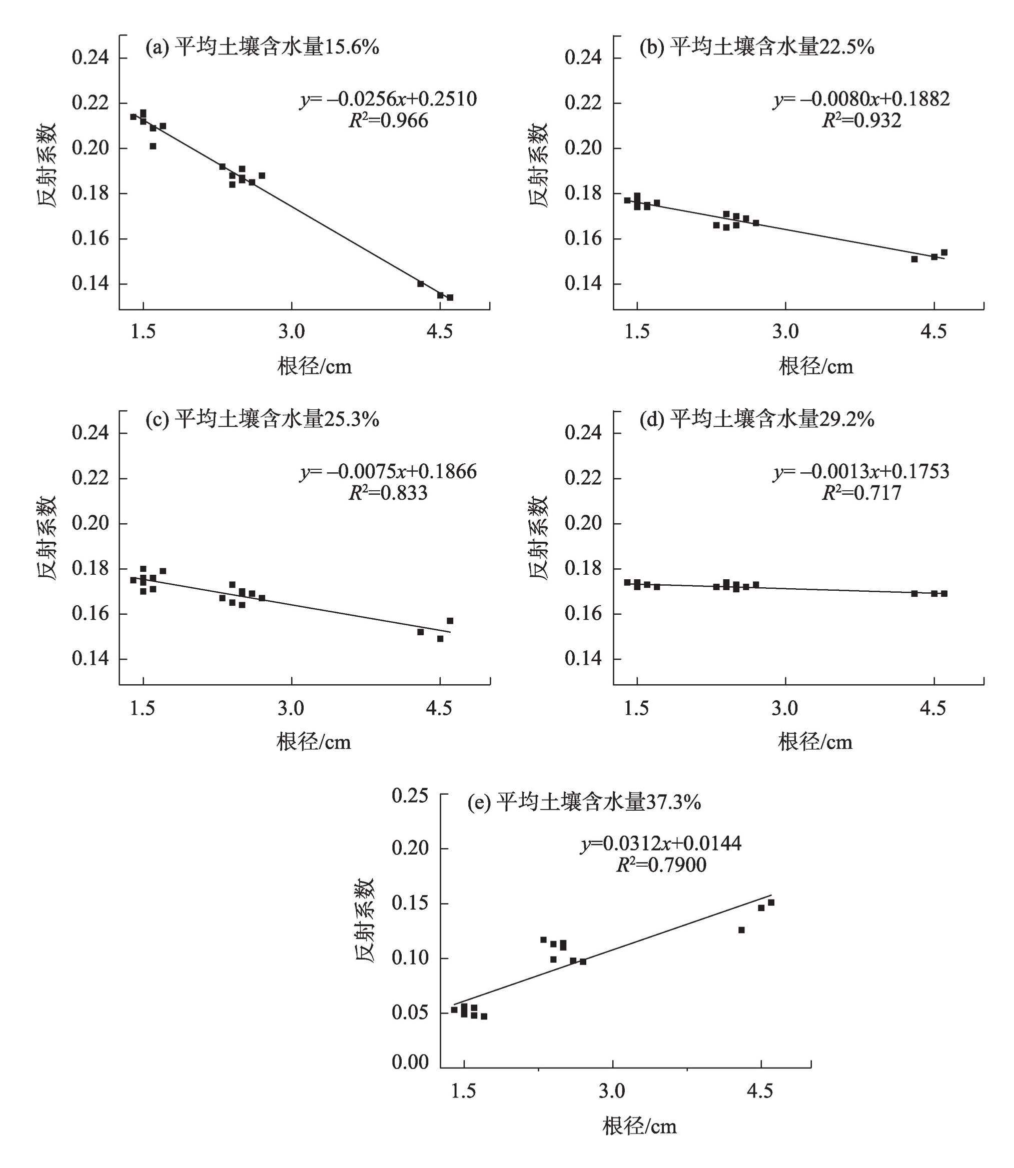


图9 不同平均土壤含水量下根径与探地雷达根点反射系数拟合关系

Fig. 9 Fitting relationship between root diameter and GPR root reflection coefficient under different average soil moisture contents

提高。本研究认为,随着平均土壤含水量的增加,探地雷达的根点识别率减低。在天线频率不变的情况下(500 MHz),进行了5次雷达探测以识别根系,结果发现存在明显差异。由于实验中样根的含水量基本稳定,而5次雷达探测时样坑0~30 cm土层的平均土壤含水量依次为37.3%、29.2%、25.3%、22.5%和15.6%。因此可以推断,平均土壤含水量的变化导致了根系和土壤的相对介电常数差值发生变化,进而影响根点识别的准确度。仅从平均土壤含水量角度考虑根的识别率,探地雷达在进行根系探测时,砂土优于壤土,壤土优于黏土[1]。

在5次雷达探测扫描中,不同土层深度的根点识别率如图10a所示。在3种土层深度上,20 cm土层深度的识别率最佳,均超过60%。Tanikawa等[36]研究发现,根系的埋藏深度对探地雷达的准确性有影响。黎蕾等[37]也提出了类似观点,即根系的埋藏深度和水平间距都会影响探地雷达的准确性。在10 cm土层处的雷达识别率相对较低,可能是因为浅层地面直达波的信号较强,容易掩盖一些浅层根的有效信号,从而导致根点识别率较低。同时,频率为500 MHz的天线在浅层根系探测中的分辨率相对较低,这也容易导致漏探测到一些浅层根系,进而影响浅层根的识别率。

在30 cm土层处,第1 d扫描和第12 d扫描的根点识别率分别为33%和100%。两次雷达扫描时,0~30 cm土层的平均土壤含水量分别为37.3%和15.6%。可以看出,当平均土壤含水量较高时,土壤黏粒对雷达波的干扰较强,会加速雷达电磁信号的衰减,从而降低雷达的识别率。同时,随着土壤水分的蒸发和下渗,低平均土壤含水量下雷达信号的衰减变缓,识别率逐渐提高。此外,在第3 d扫描时,探地雷达在3个土层深度上的识别率分别为0%、87.5%和0%。

实验发现,两次扫描间隔期间,由于水分下渗造成了样坑表层土壤下陷,在探地雷达探测的测线路径下方存在空洞,扫描后我们对表层土壤下陷区进行了回填,以保证后续实验的顺利进行。因此,研究认为这一情况导致了10 cm土层处雷达反射波信号发生剧烈变化,从而掩盖了该土层处的样根反射信号,在后期雷达影像解译过程中无法判定根点位置。同时,第3 d扫描时,30 cm土层处的土壤含水量为29.748%,在30 cm土层深度上该土壤含水量对雷达信号衰减的影响,可能高于其他土层深度。分析认为,水分下渗导致土壤下陷并形成地下空洞以及土壤含水量变化是造成第3 d扫描时,10 cm和30 cm土层处的根点识别率为0的主要原因。建议在进行相关实验时,夯实探地雷达测线路径下的土壤,避免土壤下陷影响实验精度。

在不同平均土壤含水量条件下,根径变化对探地雷达根点识别的影响见图10 b。平均土壤含水量随时间或不同地点的变化会影响信号的衰减和传播速度,从而影响探地雷达返回信号的强度[33]。在2 cm和2.5 cm的平均根径级别中,根径越大,探地雷达的根点识别率就越高。但是在平均根径为4.5 cm时,5个平均土壤含水量梯度下的识别率都小于根径为2.5 cm时的识别率。这可能是由于短时间内灌入样坑的水分,在30 cm土层处保持较高且较为稳定的状态,过量的水分含量导致识别率降低。如果

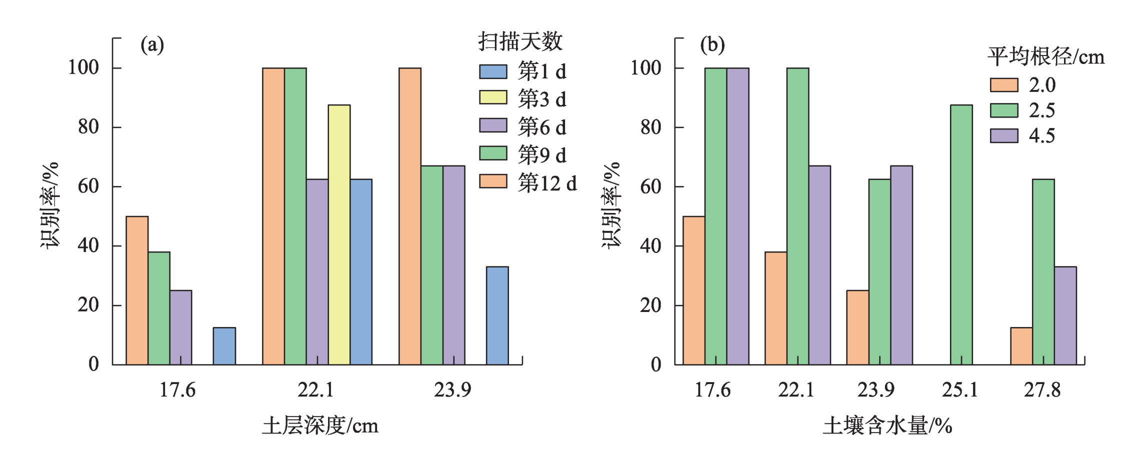


图10　不同影响因素下探地雷达根点识别结果

Fig. 10　GPR root point identification results under different influencing factors

考虑雷达天线的影响,浅层根系配合高频天线在低平均土壤含水量和粗根条件下容易被探测到,深层根系配合低频天线在低的平均土壤含水量和粗根条件下容易被探测到[38-39]。

4 结 论

本研究通过控制实验,选用500 MHz探地雷达在山西吉县蔡家川流域的油松人工林内开展野外预埋根系的探测实验,在5个土壤含水量梯度下对探地雷达波速、振幅等均进行了分析,结合探地雷达波谱图像,证实了土壤含水量对探地雷达根系探测有显著影响。研究表明,探地雷达波速、振幅、反射系数、根点识别率都与土壤含水量呈负相关,随着土壤含水量的增加,探地雷达波速会逐渐减小,振幅变化趋于平缓,根点识别率降低。在良好的探测条件下,探地雷达能够较好的识别地下粗根。土壤含水量为15.6%时,根点识别率最高(79%),土壤含水量为37.3%时,识别率最低(32%)。因此,研究认为,土壤含水量是影响探地雷达根系探测精度的主要因素,土壤含水量较高的土层,根点识别率相对较低。综上,建议在土壤含水量较低的地区或季节,使用探地雷达进行植物根系探测,同时可以采用多种天线频率组合进行探测,从而获得更高的精准度和更有参考价值的植物根系生物量研究结果。

参考文献(References):

[1] Cox K D, Scherm H, Serman N. Ground-penetrating radar to detect and quantify residual root fragments following peach orchard clearing[J]. Hort Technology, 2005, 15(3): 600-607.

[2] Butnor J R, Doolittle J A, Kress L, et al. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States[J]. Tree physiology, 2001, 21(17): 1269-1278.

[3] Amram E, Tom B. PlantRoots: The Hidden Half[M]. Florida: Chemical Rubber Company Press, 2013.

[4] Liu X, Dong X, Leskovar D I. Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: A review[J]. International Agrophysics, 2016, 30(4): 533-543.

[5] 徐煖银, 郭泺, 薛达元, 等. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1969-1978. [Xu Xuanyin, Guo Luo, Xue Dayuan, et al. Land use structure and the dynamic evolution of ecosystem service value in Gannan region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1969-1978.]

[6] 张建亮, 钱者东, 徐网谷, 等. 国家级自然保护区生态系统格局十年变化(2000—2010年)评估[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 8067-8076. [Zhang Jiangliang, Qian Zhedong, Xu Wanggu, et al. Ecosystem pattern variation from 2000 to 2010 in national nature reserves of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 8067-8076.]

[7] 陈万旭, 李江风, 姜卫, 等. 豫西山区土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 376-381. [Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Jiang Wei, et al. Impacts of land use change on ecosystem service values based on RS and GIS in western mountainous area of He'nan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 376-381.]

[8] Conyers L B, Goodman D. Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists[D]. Washington: Altamira Press, 1997.

[9] Guo L, Chen J, Cui X, et al. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review[J]. Plant and Soil, 2013, 362(1-2): 1-23.

[10] Jiri H, Čermák Jan, Šustek Svatopluk. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar[J]. Tree Physiology, 1999, 19(2): 125-130.

[11] Alani A M, Lantini L. Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: A focus on ground penetrating radar[J]. Surveys in Geophysics, 2020, 41: 605-646.

[12] Xiao L, Li C, Cai Y. Interactions between soil properties and the rhizome-root distribution in a 12-year Moso bamboo reforested region: Combining ground-penetrating radar and soil coring in the field[J]. Science of The Total Environment, 2021, 800: 149467.

[13] 赖娜娜, 袁承江, 唐硕, 等. 应用探地雷达探测古树根系分布[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(11): 124-126. [Lai Nana, Yuan Chengjiang, Tang Shuo, et al. Application of ground-penetrating radar to detection of root system distribution of a veteran tree[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(11): 124-126.]

[14] 王泽鹏, 张潇巍, 薛芳秀, 等. 探地雷达树木根系定位与直径估算[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 160-168. [Wang Zepeng, Zhang Xiaowei, Xue Fangxiu, et al. Estimating the location and diameter of tree roots using ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 160-168.]

[15] 邱啟璜, 牛健植, 王迪, 等. 基于探地雷达识别林地粗根和石砾[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 99-109. [Qiu Qihuang, Niu Jianzhi, Wang Di, et al. Identification of coarse roots and rock fragments in woodland based on ground penetrating radar[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 99-109.]

[16] 李蒙, 徐金颢, 戴钊, 等. 基于探地雷达途径的小叶杨粗根空间分布特征研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(6): 89-94. [Li Meng, Xu Jinhao, Dai Zhao, et al. Spatial distribution characteristics of the coarse roots of *Populus simonii* based on ground penetrating radar[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(6): 89-94.]

[17] Bi L, Xing L, Liang H, et al. Estimation of coarse root system diameter based on ground-penetrating radar forward modeling[J]. Forests, 2023, 14: 1370.

[18] Sun D, Jiang F, Wu H, et al. Root location and root diameter estimation of trees based on deep learning and ground-penetrating radar[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 344.

[19] Dannoura M, Hirano Y, Igarashi T. Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar[J]. Plant Biosystems, 2008, 142(2): 375-380.

[20] Bain J C, Day F P, Butnor J R. Experimental evaluation of several key factors affecting root biomass estimation by 1500 MHz ground-penetrating radar[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): 13-37.

[21] 王思淇, 张建军, 张彦勤, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林下植物群落物种多样性[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1141-1151. [Wang Siqi, Zhang Jianjun, Zhang Yanqin, et al. Understory plant community diversity of *Robinia pseudoacacia* plantation with different densities in the loess plateau of western Shanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1141-1151.]

[22] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 等. 晋西黄土区土地利用方式对土壤C: N: P化学计量特征及土壤理化性质的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 990-999. [Hu Yawei, Sun Ruoxiu, Shen Mingshuang, et al. Effects of land use types on the stoichiometric characteristics of soil C: N: P and the physical and chemical properties of soil in western Shanxi Loess Region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 990-999.]

[23] 刘秀萍, 陈丽华, 陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 647-651. [Liu Xiuping, Chen Lihua, Chen Jihu. Study on the distribution of root density of *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabulaeformis* Carr. [J]. Arid Zone Research, 2007, 24(5): 647-651.]

[24] 崔喜红, 陈晋, 关琳琳. 探地雷达技术在植物根系探测研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6): 606-611. [Cui Xihong, Chen Jin, Guan Linlin. The application of ground penetrating radar to plant root system detection[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 606-611.]

[25] 韩舒. 基于市政道路三维探地雷达检测技术研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(13): 106-108. [Han Shu. Research on non-destructive testing technology based on municipal roads[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(13): 106-108.]

[26] 游日, 董茂干, 探地雷达的发展与应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(5): 20-23, 37. [You Ri, Dong Maogan. Development and application of ground penetrating radar[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2010, 27(5): 20-23, 37.]

[27] 张璐云, 崔喜红, 全振先, 等. 野外自然条件下探地雷达识别植物根系的有效性研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(6): 2764-2774. [Zhang Luyun, Cui Xihong, Quan Zhenxian, et al. Availability of ground penetrating radar in recognizing plant roots in field[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(6): 2764-2774.]

[28] Ryazantsev P A, Hartemink A E, Bakhmet O N. Delineation and description of soil horizons using ground- penetrating radar for soils under boreal forest in Central Karelia (Russia) [J]. Catena, 2022, 214: 106285.

[29] 周岐山, 戴胜生, 袁相权. 浙江山区地质雷达波速分析[J]. 工程勘察, 2014, 42(100): 78-82. [Zhou Qishan, Dai Shengsheng, Yuan Xiangquan. GPR wave velocity analysis in the mountainous area of Zhejiang Province[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2014, 42(100): 78-82.]

[30] 何宏智. 探地雷达在地质灾害及地基稳定性研究中的应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019. [He Hongzhi. Application of Ground Penetrating Radar in the Study of Geological Disasters and Foundation Stability[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.]

[31] Hirano Y, Dannoura M, Aono K, et al. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar[J]. Plant Soil, 2009, 319: 15-24

[32] 王齐仁. 隧道地质灾害超前探测方法研究[D]. 湖南: 中南大学, 2008. [Wang Qiren. The Study of Advanced Detecting Methods on Tunnel Geological Hazards[D]. Hunan: Central South University, 2008.]

[33] Cui X, Liu X, Cao X, et al. Pairing dual frequency GPR in summer and winter enhances the detection and map of coarse roots in the semi arid shrubland in China[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(2): 236-251.

[34] De Aguiar G Z, Lins L, de Paulo M F, et al. Dielectric permittivity effects in the detection of tree roots using ground-penetrating radar [J]. Journal of Applied Geophysics, 2021, 193: 104435.

[35] Seyfried D, Schoebel J. Ground penetrating radar for asparagus detection[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 126: 191-197.

[36] Tanikawa T, Ikeno H, Dannoura M, et al. Leaf litter thickness but not plant species can affect root detection by ground penetrating radar[J]. Plant and Soil, 2013, 408(1-2), 271-283.

[37] 黎蕾, 汤玉喜, 李永进, 等. 基于探地雷达对根系探测的限制性因素研究[J]. 湖南林业科技, 2020, 47(6): 60-67. [Li lei, Tang Yuxi, Li Yongjin, et al. Research on limiting factors of root system detection using ground penetrating radar[J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2020, 47(6): 60-67.]

[38] Barton C V M, Montagu K D. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions[J]. Tree Physiology, 2004, 24(12): 1323-1331.

[39] 王明凯, 李文彬, 文剑. 基于探地雷达对粗根的识别技术研究[J]. 森林工程, 2020, 36(3): 21-27. [Wang Mingkai, Li Wenbin, Wen Jian. Study on recognition technology of coarse roots using ground-penetrating radar[J]. Forestry Engineering, 2020, 36(3): 21-27.]

Effect of soil moisture content on the accuracy of root configuration detection by ground penetrating radar

WANG Bo[1], ZHANG Jianjun[1,2], LAI Zongrui[1], ZHAO Jiongchang[1], HU Yawei[1], YANG Zhou[1], LI Yang[1], WEI Zhaoyang[1]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Chinese National Ecosystem Research Network, Jixian 042200, Shanxi, China)

Abstract: Root biomass is an important part of the soil ecosystem, however, due to the limitations of measurement techniques and methods, it is impossible to rapidly assess it. The ground penetrating radar (GPR) is an efficient and nondestructive geophysical tool through which root information can be obtained without damaging the soil environment. However, accuracy during the detection and identification of underground roots by GPR is significantly affected by many factors such as soil water content, root roughness, length, and extension direction. In particular, soil water content has an obvious effect on root detection. In this study, in situ root embedding detection experiments were carried out to investigate the influence of soil water content on root detection via GPR. Combined with the changes in wave velocity, amplitude, and the root reflection coefficient of the GPR, the root point identification rate and root point distance root point root mean square error were analyzed under different average soil water content. The results showed that (1) the wave velocity and amplitude of the GPR were important parameters to determine variations in soil water conten during root detection; (2) the GPR's velocity decreased and the radar amplitude flattened with the increasing soil water content; (3) as the root diameter increased at different soil depths, the GPR's wave velocity also increased and the GPR's amplitude tended to be drastic changes; (4) the root point recognition rate and soil water content were negatively correlated ($P<0.05$), and the best recognition effect was achieved when the soil water content was 15%–25%. These results are great significance for quantifying the effect of soil moisture content on the root detection accuracy of the GPR. In addition, it provide a reference for using this tool for root detection and are particularly important for the estimation of plant root biomass.

Keywords: ground penetrating radar; root system; soil moisture content; non-destructive testing; loess area of western Shanxi Province